

# Vigilancia del carbono oceánico y de la acidificación de los océanos

por Toste Tanhua<sup>1</sup>, James C. Orr<sup>2</sup>, Laura Lorenzoni<sup>3</sup> y Lina Hansson<sup>4</sup>



Según el Boletín nº 10 de la OMM sobre los gases de efecto invernadero, la concentración del dióxido de carbono atmosférico ( $\text{CO}_2$ ) ha aumentado un 42% desde el comienzo de la revolución industrial debido a las emisiones por la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y el cambio en el uso del suelo. Hasta el año 2010, los océanos habían absorbido aproximadamente  $155 \pm 30$  petagramos (Pg, 1 petagramo =  $10^{15}$  gramos-fuerza) del  $\text{CO}_2$  antropógeno [Khatiwala y otros, 2013], el equivalente al 28% de las emisiones totales de  $\text{CO}_2$  en el mismo periodo, lo que limitó el aumento del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera. Aunque esta absorción de  $\text{CO}_2$  por el océano reduce el cambio climático, también tiene consecuencias potencialmente severas para la química y la biología oceánicas.

Desde el comienzo de la era industrial, la actividad humana ha añadido, en promedio, 4 kg de dióxido de carbono por día y persona al océano. Este  $\text{CO}_2$  antropógeno reacciona con el agua para formar un ácido. Mientras continúe aumentando el  $\text{CO}_2$  atmosférico, cada vez entrará más  $\text{CO}_2$  en el océano, reduciendo el pH (el pH es una medida de la acidez donde los valores más bajos corresponden a líquidos más ácidos) mediante un proceso conocido como acidificación del océano. A medida que aumenta la acidez (concentraciones mayores de iones hidrógeno,  $\text{H}^+$ ), simultáneamente, disminuye la concentración de iones carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Estas reducciones de  $\text{CO}_3^{2-}$  reducen la capacidad química de los océanos de continuar absorbiendo más  $\text{CO}_2$  a la vez que degrada el potencial de algunos organismos marinos para producir y mantener el material de su esqueleto y concha.

Ya es detectable y está acelerándose la disminución del pH de la superficie oceánica debido a la acidificación de los océanos. Las mediciones realizadas en lugares con series temporales biogeoquímicas por todo el mundo revelan tendencias similares en la reducción del pH oceánico (disminuciones de entre 0,0015 y 0,0024 unidades de pH por año); sin embargo, estas series de datos solo están disponibles para las últimas décadas. Para estimar los cambios anteriores, los científicos han utilizado modelos y extrapolaciones realizadas a partir de los datos. Ambos enfoques concuerdan en que desde 1860, el pH de la superficie del océano ha descendido desde 8,2 a 8,1, que corresponde con un aumento del 26% en  $\text{H}^+$ . El actual ritmo de cambio se puede poner en contexto analizando los registros paleoclimáticos. El cambio actual parece ser el más rápido en al menos 300 millones de años, siendo el evento de acidificación natural conocido más rápido —ocurrido hace 55 millones de años— probablemente 10 veces más lento que el actual.

Los modelos del sistema Tierra proyectan una aceleración de la acidificación, al menos hasta mediados de siglo, bajo la mayoría de los escenarios de emisiones. Cuando los modelos del sistema Tierra que participaron en la fase 5 del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) fueron forzados con los últimos escenarios del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) sistemáticamente se puso de relieve que las reducciones del pH superficial dependerían casi únicamente del recorrido del  $\text{CO}_2$  atmosférico que se siguiese. Entre 1850 y 2100, y bajo el escenario del IPCC más conservador para la trayectoria de las concentraciones de gases de efecto invernadero, la disminución del pH superficial medio global entre los modelos varía entre 0,12 y 0,14, un incremento de un 36% en la acidez; bajo el peor escenario, las variaciones se sitúan entre 0,41 y 0,43, un incremento de la acidez de un 165%.

La elevada absorción del  $\text{CO}_2$  por el océano altera el sistema del carbonato marino que controla la acidez del agua oceánica. Cuando el  $\text{CO}_2$  se disuelve en el agua del océano forma ácido carbónico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ), un ácido débil que se disocia en bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e iones hidrógeno ( $\text{H}^+$ ). El aumento de  $\text{H}^+$  significa un aumento de acidez (pH más bajo). Pero el pH no es el único afectado. El ritmo de

<sup>1</sup> Centro Helmholtz para la investigación oceánica de Kiel, GEOMAR, Kiel (Alemania).

<sup>2</sup> Laboratorio de las ciencias del clima y del medio ambiente, CEA-CNRS-UVSQ, París (Francia); Centro internacional de coordinación sobre la acidificación de los océanos, Mónaco.

<sup>3</sup> Laboratorio de las ciencias del clima y del medio ambiente, CEA-CNRS-UVSQ, París (Francia); Centro internacional de coordinación sobre la acidificación de los océanos, Mónaco.

<sup>4</sup> Centro internacional de coordinación sobre la acidificación de los océanos, Mónaco.

acidificación de los océanos se ralentiza por la presencia de  $\text{CO}_3^{2-}$  que captura la mayoría de los  $\text{H}^+$  liberados nuevamente, formando bicarbonatos. Sin embargo, esta reacción amortiguadora consume  $\text{CO}_3^{2-}$ , reduciendo la capacidad química de absorber más  $\text{CO}_2$  por las capas superficiales del océano. Actualmente, esta capacidad es solo el 70% de la que había al comienzo de la era industrial, y puede perfectamente reducirse a tan solo el 20% para finales de siglo. Los mismos modelos proyectan que las concentraciones de  $\text{CO}_3^{2-}$  alcanzarán niveles tan bajos a mediados de siglo que el crecimiento de los corales de la zona tropical puede llegar a ser insostenible. En los fríos océanos polares, donde el  $\text{CO}_3^{2-}$  es, naturalmente, menos abundante, las concentraciones de  $\text{CO}_3^{2-}$  ya han comenzado a descender por debajo de un nivel crítico en el que las aguas llegan a ser corrosivas para el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), mineral conocido como aragonito (el principal componente de las conchas y esqueletos marinos). Para finales de siglo se prevé que estas condiciones corrosivas se extiendan a través de los océanos polares, aumentando la preocupación por la muerte de organismos tales como los pterópodos (caracoles) que secretan aragonito para construir sus conchas, y por la seguridad alimentaria, ya que muchos organismos importantes desde el punto de vista económico dependen de la disponibilidad de  $\text{CO}_3^{2-}$  para sobrevivir.

A pesar de la extraordinaria coherencia de las proyecciones sobre los cambios en el pH de la superficie de los océanos, el acuerdo entre los modelos sobre la magnitud de los cambios por debajo de la superficie es menor. Además, los modelos actuales del sistema Tierra tienen una resolución escasa y no están diseñados para estudiar los cambios en las zonas costeras donde otras influencias antropógenas pueden también afectar a los cambios en el pH.

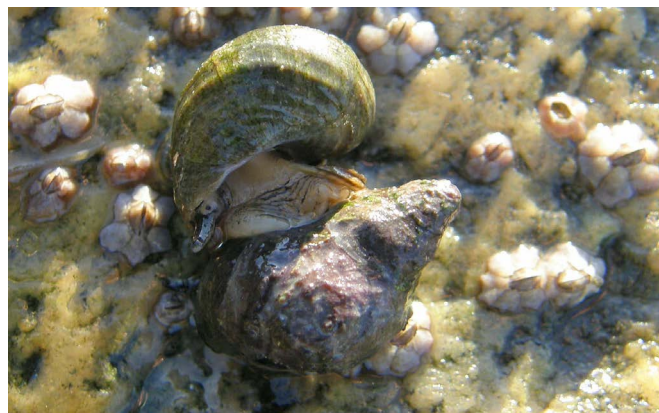
### Impactos biológicos

Las posibles consecuencias de la acidificación del océano sobre los organismos marinos son complicadas por naturaleza. Los primeros estudios se centraron en los organismos calcificadores, como moluscos, corales, algas coralinas y algunos tipos de plancton, porque se demostró que su capacidad de producir el material de los esqueletos y conchas (vía calcificación) depende de la abundancia de  $\text{CO}_3^{2-}$ . Pero hay otra preocupación y es que cambios en el pH del océano podrían afectar a los procesos fisiológicos que dependen de la química intracelular estable. Por ejemplo, los organismos marinos tendrían que utilizar más energía para regular la química entre sus células, lo que repercutiría en una menor disponibilidad energética para otros procesos biológicos tales como el crecimiento o la reproducción.

En la última década se ha registrado un aumento exponencial en materia de investigación y publicaciones dirigidas a la evaluación de los efectos del elevado contenido en  $\text{CO}_2$  sobre los organismos marinos. A un ritmo de duplicarse cada 2 o 3 años, el número de publicaciones anuales centradas en la acidificación del océano llegó a ser de 540 en 2013 (base de datos bibliográfica del Centro internacional de coordinación sobre la acidificación de los océanos, del Organismo Internacional de Energía Atómica). En

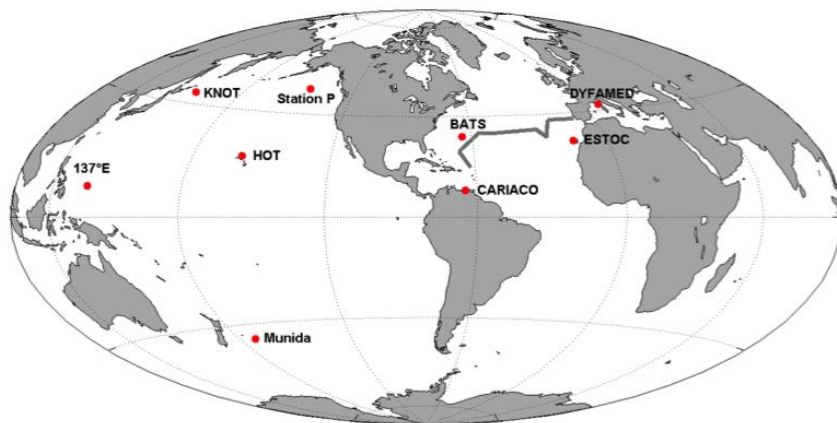
2013, Thompson-Reuters calificó la acidificación del océano como el primer frente de investigación dentro de las ciencias ecológicas y medioambientales. Aunque resulta alentador, tal crecimiento ha hecho cada vez más difícil sintetizar los resultados. Para resumir cuantitativamente los resultados de cientos de estudios y extraer unas tendencias promedio de las respuestas y de la variabilidad experimental en torno a las medias, los científicos han comenzado a usar recientemente técnicas estadísticas conocidas como metaanálisis. Uno de estos puso de manifiesto que una reducción del pH de hasta 0,5 unidades conduce a disminuciones significativas en la supervivencia, la calcificación, el crecimiento y el desarrollo, dando como resultado la escasez en un amplio espectro de organismos, pero con respuestas que difieren mucho entre los grupos. Otro metaanálisis demostró que algunos grupos (equinodermos, bivalvos, gasterópodos y corales) muestran efectos dañinos a niveles mucho más bajos de  $\text{CO}_2$  que otros (crustáceos y cefalópodos). El mismo estudio reveló que los efectos negativos de la acidificación también se observaron sobre la función cerebral y el comportamiento de los peces.

Muchas de las investigaciones realizadas hasta la fecha se han centrado en las respuestas a nivel individual, pero en algunas se han capturado numerosos organismos en grandes contenedores (mesocosmos) que o bien flotaban en una columna de agua o bien se mantenían fijos sobre los sedimentos del fondo durante semanas o meses. Las condiciones químicas de los mesocosmos se pueden manipular para que coincidan con las que se proyectan para el futuro, permitiendo a los investigadores estudiar los futuros efectos potenciales de la acidificación del océano sobre los organismos analizados. Otro enfoque prometedor ha consistido en estudiar los efectos de la acidificación sobre los ecosistemas enteros durante un periodo largo de tiempo mediante la exploración de lugares naturales donde se ha encontrado  $\text{CO}_2$  puro que escapa del fondo marino. En uno de estos estudios, llevado a cabo cerca del monte Vesubio, en la bahía de Nápoles, la región con pH bajo y enriquecida en  $\text{CO}_2$  mostró menos biodiversidad que las regiones adyacentes



Susannah Anderson

*Los primeros estudios de las posibles consecuencias de la acidificación del océano sobre los organismos marinos se centraban inicialmente en los organismos calcificadores, como los moluscos, por su capacidad de producir el material del esqueleto o concha (vía calcificación) y por su dependencia de la abundancia de carbonatos.*



*Situación de las estaciones con series temporales mencionadas en este artículo (puntos rojos) y posición de la sección mostrada en la última figura de la página 51 (línea gris).*

(p. ej. muchos menos calcificadores), y las conchas que había eran más frágiles. Estos efectos en los ecosistemas sometidos a la acidificación durante un periodo largo de tiempo son coherentes con los que se han observado en laboratorios y experimentos de campo durante periodos cortos y en los que intervenían organismos individuales.

### Respuestas y otros factores de estrés

La acidificación del océano está ocurriendo a gran escala conjuntamente con otros cambios, como el calentamiento, el aumento de la estratificación (en el océano, la estratificación —o distribución de la densidad del agua— está gobernada principalmente por las variaciones en la temperatura y en la salinidad del agua) y las reducciones de las concentraciones de oxígeno por debajo de la superficie, todos ellos relacionados con el cambio climático. El calentamiento y la estratificación, generalmente, tienen poco efecto sobre la acidificación. El calentamiento contrarresta menos del 10% del cambio producido por el aumento del  $\text{CO}_2$  debido a la química del carbonato y a la solubilidad del  $\text{CO}_2$ . La entrada de agua dulce por el aumento de la fusión de hielo agrava la acidificación prevista, especialmente en los lugares donde el ritmo de pérdida del hielo es significativo, como en el Ártico.

El mayor efecto de la acidificación del océano sobre el clima (a través del  $\text{CO}_2$  atmosférico) es químico. El aumento de  $\text{CO}_2$  reduce el  $\text{CO}_3^{2-}$ , que a su vez disminuye la capacidad del océano de amortiguar incrementos adicionales de  $\text{CO}_2$ . Para un aumento del  $\text{CO}_2$  atmosférico de 1 parte por millón (ppm), la absorción actual asociada de carbono por el océano es solo del 70% de la capacidad que había al comienzo de la era industrial. Si el  $\text{CO}_2$  atmosférico se duplicara respecto a su nivel preindustrial hasta 560 ppm, la absorción del carbono por el océano sería solo del 40%, y si alcanzara las 800 ppm, sería solo del 26%. Existen otros efectos inciertos pero de mucha menor magnitud.

En las zonas costeras, también habrá factores adicionales de estrés que actúan a una escala más local, por ejemplo, la eutrofización (cantidad excesiva de nutrientes que estimula el crecimiento incontrolado de las algas, mermando así el oxígeno que hay en el agua ya que estas mueren y se descomponen por las bacterias), la llegada de una mayor cantidad de agua dulce y la deposición atmosférica de nitrógeno y de azufre antropógenos. Persiste el reto de abordar cómo varían

los impactos biológicos cuando los numerosos factores de estrés actúan conjunta o individualmente.

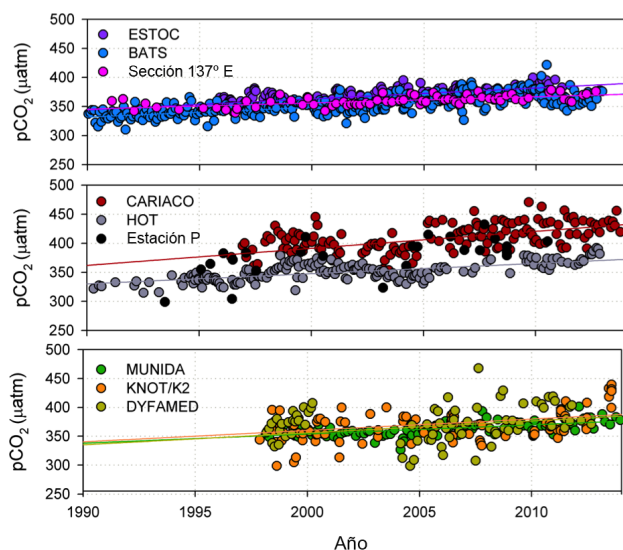
### Cambios en la química del carbonato oceánico

Las tendencias a la disminución del pH y al aumento del  $\text{pCO}_2$  debidas a la absorción del carbono antropógeno son observables en el océano. Como el  $\text{CO}_2$  antropógeno ingresa en el océano por su superficie, las tendencias deberían ser más intensas en esta zona, pero las tendencias de la señal se ven enmascaradas por una gran variabilidad temporal, principalmente en forma de ciclos estacionales, aunque están presentes tanto la variabilidad a largo como a corto plazo. Por tanto, para observar estas tendencias se necesita disponer de series temporales de observaciones relativamente frecuentes y de longitud considerable. En todo el mundo hay unos pocos lugares de observación con series temporales oceánicas prolongadas que ofrecen series de datos con longitud temporal suficiente —al menos 10 años de mediciones— para caracterizar los cambios en la bioquímica y los ecosistemas oceánicos. Las estaciones donde se recogen las series temporales (véase el mapa de arriba) tienen que ser representativas de las regiones oceánicas mayores.

En todos los puntos, el  $\text{pCO}_2$  superficial ha aumentado y el pH ha disminuido con el tiempo debido al aumento del  $\text{CO}_2$  antropógeno (véase la gráfica superior izquierda de la página 51). Para evaluar tales cambios, se ha eliminado la estacionalidad de los datos de superficie mediante el procedimiento recomendado por la Vigilancia de la Atmósfera Global de la OMM y se han ajustado los datos a una tendencia lineal en el rango de mediciones para obtener cambios decenales comparables para cada estación. Aunque hay variaciones estacionales e interanuales en el  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua del océano,  $\text{pCO}_2$ , este ha aumentado a razón de 1,3 a 2,8 microatmósferas ( $\mu\text{atm}$ ) por año (para comparar, el contenido atmosférico aumentó a un ritmo promedio de 2,1 ppm por año durante los últimos 10 años), mientras que el pH de la superficie oceánica ha disminuido durante el periodo de las observaciones a un ritmo medio de  $-0,0013$  por año a  $-0,0024$  por año, dependiendo de la localización. La velocidad de estos cambios depende no solo de la química, sino también de otros factores característicos de cada región, tanto físicos como biológicos. En ESTOC, HOT y BATS (véase la figura de la página 50), el ritmo de aumento del  $\text{pCO}_2$  superficial se corresponde

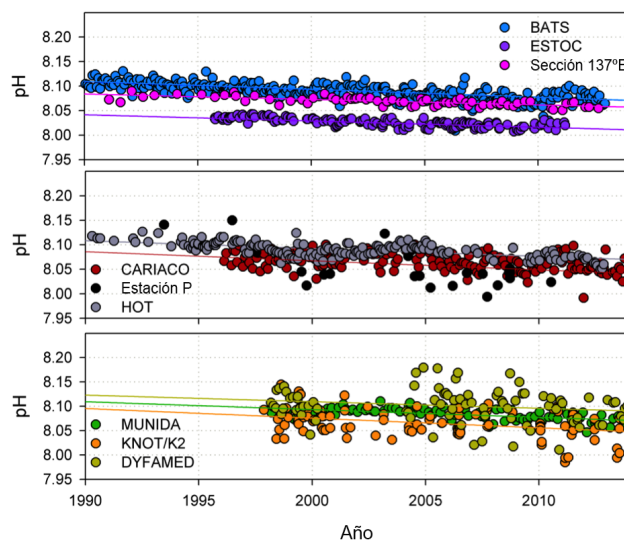
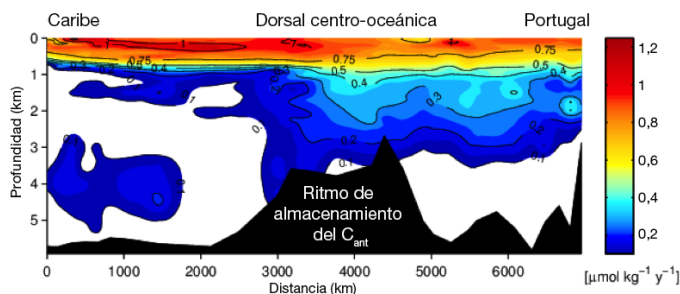


con el aumento de la concentración del  $\text{CO}_2$  atmosférico; en DYFAMED estos cambios están afectados por los cambios en la circulación en el Mediterráneo. En CARIACO, el cambio del  $\text{pCO}_2$  superficial fue uno de los valores medidos más alto, lo que puede atribuirse a un calentamiento de las aguas superficiales ligado a una disminución de los afloramientos que conducen, a su vez, a productividades biológicas más bajas. Las series temporales subpolares presentaron algunas de las variabilidades temporales más altas, causadas en parte por diferencias estacionales grandes en temperatura y en producción biológica.



*Series temporales de las medidas de  $\text{pCO}_2$  en la superficie del océano sin estacionalidad.*

Aunque aquí nos centramos en las observaciones de superficie, una gran parte de la columna de agua se está viendo afectada por la absorción del carbono antropógeno y por los cambios asociados en la química oceánica. La señal mayor del aumento del  $\text{pCO}_2$  y de la acidificación del océano se encuentra normalmente en el océano superficial, pero el principal mecanismo de control a largo plazo de la absorción del carbono antropógeno es el transporte desde la capa de mezcla superficial al océano. Por lo general, este mecanismo está regulado por procesos físicos que “ventilan” el océano. Actualmente, los cambios en la química del carbonato del océano más profundo (por debajo de la superficie), tales como las tendencias del pH y del carbono disuelto, solo se pueden establecer a partir de la recopilación reiterada de medidas realizadas por barcos a través de las mismas secciones oceánicas. Por eso, se debe repetir una red de cruceros a escala global aproximadamente todas las décadas. La frecuencia



*Series temporales de las medidas del pH en la superficie del océano, sin estacionalidad, y sus líneas de tendencia. La posición de las estaciones con series temporales se sitúa sobre el globo (véase figura de la página anterior). El pH se representa según una escala total de temperaturas medidas in situ.*

de muestreo es menor porque el océano profundo es mucho menos variable que la superficie del océano; sin embargo, aún son necesarias las correcciones por variabilidad a pequeña escala, como la turbulencia.

En la actualidad se llevan a cabo pocas observaciones regulares de  $\text{CO}_2$  en el océano, y varios regímenes oceánicos principales carecen, por completo, de mediciones sistemáticas de carbono. El mantenimiento, durante un tiempo prolongado, de medidas oceánicas representa un desafío logístico, particularmente para los países en desarrollo, y esta circunstancia plantea importantes obstáculos para cuantificar las tendencias en la química del carbonato y en la acidificación del océano. Una buena vigilancia de la absorción oceánica del  $\text{CO}_2$  es importante para entender el ciclo global del carbono: ¿dónde acaba el  $\text{CO}_2$  de los combustibles fósiles? Hoy en día solo unas pocas áreas oceánicas están cubiertas por observaciones continuas y sistemáticas, dificultando el conocimiento de la variabilidad espacial y temporal y las tendencias de la absorción del carbono por parte del océano. Es necesario mantener y ampliar las observaciones de  $\text{CO}_2$  en estaciones oceánicas, junto con las mediciones oceánicas de interior y de superficie desde barcos.

Un nuevo esfuerzo internacional, la Red mundial de observación de la acidificación de los océanos (GOA-ON; [www.goa-on.org](http://www.goa-on.org)) está tratando de conseguir este objetivo.

**Las referencias están disponibles en la versión en línea.**

*Aumento del carbono inorgánico disuelto a lo largo de la columna de agua, debido a la absorción del  $\text{CO}_2$  antropógeno, en la sección que va desde el Caribe hasta Portugal. Las medidas de carbono inorgánico disuelto se utilizan para evaluar las tasas globales de absorción del carbono antropógeno ( $C_{ant}$ ) pero se requieren datos exactos, tales como los disponibles a través de la recopilación de datos a gran escala conocidos como GLODAP o CARINA.*